

# 蒸发液面热对流与温度不连续现象的实验研究

朱志强 刘秋生

(中国科学院微重力重点实验室, 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘要** 实验研究了存在蒸发界面的水平液层中的热毛细对流对汽/液界面处温度不连续的影响。对于单纯的热毛细对流从理论和实验已有深入研究, 但目前国际对蒸发与热毛细对流的耦合尚缺乏研究。特别是近期 C. A. Ward 等人研究发现了蒸发汽液界面处的温度不连续现象。本文以存在蒸发界面的水平薄液层为研究对象, 测量了蒸发界面处的温度分布, 研究了普适环境下蒸发和热毛细对流对汽/液界面处温度不连续的影响。

**关键词** 蒸发; 热毛细对流; 温度不连续

**中图分类号:** 0551.2      **文献标识码:** A      **文章编号:** 0253-231X(2011)01-0055-03

## EXPERIMENTAL INVESTIGATION ON THE TEMPERATURE DISCONTINUITY AT AN EVAPORATING LIQUID SURFACE

ZHU Zhi-Qiang LIU Qiu-Sheng

(Key Laboratory of Microgravity/CAS, Institute of Mechanics, Beijing 100190, China)

**Abstract** The stability of thermocapillary convection in a fluid layer has been experimentally and numerically analyzed by many researchers. While the interfacial flow with evaporation, is absent of comprehensive understanding. Recently, C. A. Ward found the temperature discontinuity at an evaporating liquid interface, which couldn't explained by classical theory. In our work, we measured the temperature profiles at the evaporating liquid surface of a horizontal fluid layer, and experimental studied the co-influence of evaporation effect and thermocapillary convection on the temperature discontinuity at the evaporating interface.

**Key words** evaporation; thermocapillary convection; temperature discontinuity

## 0 引言

蒸发是自然界普遍存在的物理现象, 它在自然科学和工程应用中往往起着非常重要的作用, 例如自然界的水循环、人体内的热平衡、工业中的蒸馏过程及核反应堆降温等。

蒸发本身是一个吸热过程, 它往往和热对流共同影响着流体内的换热过程。基于空间微重力应用的实际要求, 人们从 80 年代开始对纯热毛细对流不稳定性机理进行了理论研究<sup>[1]</sup>。随后, 针对热毛细对流不稳定性进行的诸多理论和实验研究, 使人们对单纯的热毛细对流稳定性有了比较成熟的认识。

以往的研究大都针对不带蒸发界面的热毛细对流, 但近年来, 随着空间微重力流体物理的长足发展和国际空间探索中热能机械工程的实际要求, 需要人们对蒸发和热毛细对流的耦合机理有更深的认识。目前, 相应的研究正处在初级阶段。对于存在蒸发界面的水平液层中的热毛细对流来说, 已开始有

了初步的实验和理论研究<sup>[2~4]</sup>; 对特殊环境下的蒸发弯曲液面的热毛细对流, 研究发现: 蒸发汽/液界面存在着明显的温度跳变, 这与传统的蒸发汽/液界面处温度连读的认识是相违背的<sup>[5,6]</sup>。

本文将实验研究蒸发水平液层中的热毛细对流, 测量汽/液界面处的温度分布, 研究蒸发效应和热毛细对流对汽/液界面处温度不连续的影响。

## 1 实验装置

本文所采用的实验装置如图 1 所示。实验液池为 40 mm×80 mm 的矩形狭长槽, 其中 40 mm 为平行温度梯度方向长度。为形成热毛细对流, 首要的条件是存在平行于液层表面的温度梯度。本实验中, 水平温差的形成主要依靠左右两侧固壁温度的控制来实现。如图 1, 液池左侧, 循环水浴内流出来的水流在中空的铝块内循环后返回循环水浴, 控制铝块

收稿日期: 2009-12-22; 修订日期: 2010-12-16

基金项目: 国家重大自然科学基金资助项目 (No.50890182); 国家自然科学基金资助项目 (No.10772185)

作者简介: 朱志强 (1982-), 男, 山东淄博人, 助理研究员, 博士, 主要从事蒸发界面对流稳定性实验研究。

温度精度达 $0.02^{\circ}\text{C}$ ;液池右侧是两块 $3\text{ mm}$ 厚的薄铝板,通过欧陆表控制薄铝板中间的电阻加热片来达到控温的目的,控温精度为 $0.1^{\circ}\text{C}$ 。对于垂直温度梯度方向的液池前后两侧壁和底板,出于隔绝外界温度影响和实验观察的考虑,本实验选用光学玻璃。

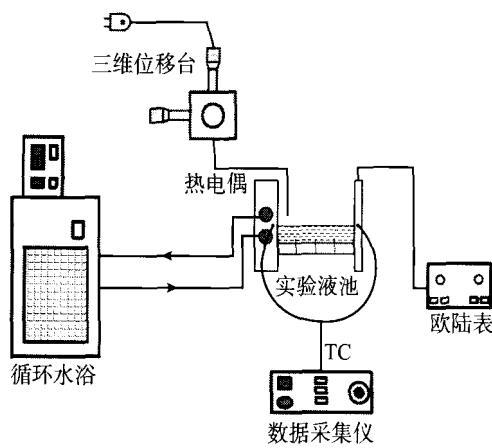


图 1 实验装置示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental apparatus

外界温度和外界空气流动往往会给实验结果带来一定的误差,为了隔绝这些因素对液面附近温度和液层内热毛细流动的影响,液池两侧控温固壁均以绝热材料包裹。另外,实验过程中,整个实验系统放置在有机玻璃箱中,去除空气流动的影响。

为精确测量蒸发汽液界面处竖直方向的温度分布,本实验依靠高精度的三维电动位移台牵引直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 的热电偶进行测温点的精确定位和精密测量,所测得的温度数据经数据采集仪导入计算机中。三维位移台的精度为 $0.1\text{ }\mu\text{m}$ ,测温精度为 $0.05^{\circ}\text{C}$ 。

## 2 文献 [5] 与本文实验结果比较讨论

### 2.1 C. A. Ward 等人实验结果

近期,加拿大学者 C. A. Ward 等人进行了一系列纯水在低压环境下的蒸发实验<sup>[5,6]</sup>。他们将 $4^{\circ}\text{C}$ 的纯水放入真空腔体中,通过控制腔体中的压强来改变纯水的蒸发速率,测量了纯水汽/液界面竖直方向的温度分布,如图 2 为压强 $300\text{ Pa}$ 时的界面温度分布。从图 2 中可以看到,蒸发界面处气相温度要远高于液相温度,即界面处存在明显的温度不连续,最高可达到 $8^{\circ}\text{C}$ 。Ward 等发现的温度不连续远高于传统分子动力学理论的预测,仅由液体和气体的热传导已不足以维持此时蒸发速率下所需要的能量。为此,他们提出:热毛细对流和热传导共同向蒸发供热,蒸发越快,热毛细对流供热比例越大。随后,他们提出了统计速率理论和表面热容的概念试图解释蒸发界面处的温度不连续,但目前来说,还存在一

定的争议,需要进一步工作来认清蒸发和热毛细对流对界面温度的影响。

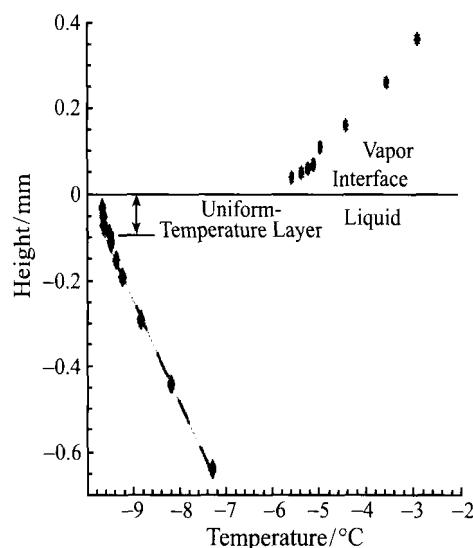


图 2 C. A. Ward 实验中纯水汽/液界面竖直方向温度分布  
Fig. 2 Temperature discontinuity in C. A. Ward's experiment

### 2.2 本文实验结果

利用上述介绍的实验装置,以水平温度梯度为控制参数,我们测量了 $2.0\text{ mm}$ 厚的 $0.65\text{cSt}$ 硅油水平液层蒸发汽/液界面处,以及界面上方气层和界面下方液层的竖直方向温度分布,如图 3 所示为外加温差 $8^{\circ}\text{C}$ 时的竖直温度分布曲线,表 1 为不同外加温度梯度下 $0.65\text{cSt}$ 硅油水平液层蒸发汽/液界面处的温度不连续变化。从图 3 中可以看到,常温常压下蒸发界面处同样存在着较为明显的温度不连续。与 Ward 等人的实验结果相比(图 2),本实验观测到的温度不连续从数值上要小,温度梯度方向要相反,即气相的温度要低于液相的温度。究其原因,Ward 实验利用压强为控制参数,可以大范围的改变纯水的蒸发速率,而本实验为抑制浮力对流,外加温度梯度不能太大,导致 $0.65\text{cSt}$ 硅油的蒸发速率改变不大;Ward 实验采用 $4^{\circ}\text{C}$ 纯水,低于实验环境温度,而本实验中 $0.65\text{cSt}$ 硅油的温度要高于室温。

从表 1 中可以看到,当外加温差增大时,蒸发界面温度不连续的数值随之增大,同时,蒸发界面

表 1  $0.65\text{cSt}$  硅油液层在不同外加温差下的温度不连续

Table 1 Temperature discontinuity for  $\Delta T$

外加温差 $\Delta T/{}^{\circ}\text{C}$	蒸发界面温度不连续/ ${}^{\circ}\text{C}$
2	-0.28
4	0.02
6	0.12
8	0.25
10	0.34

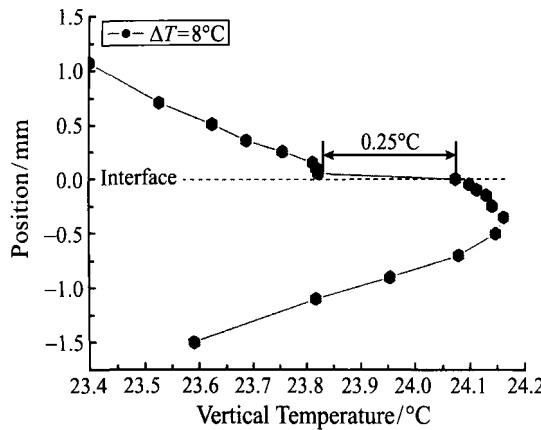


图 3 液池中央 0.65cSt 硅油液层汽液界面竖直方向温度分布

Fig. 3 Temperature discontinuity in our experiment

温度不连续存在从负值到正值的转变, 即温差小时, 气层温度高于液层温度, 温差大时, 气层温度低于液层温度。这是因为: 当外加温差比较小时, 此时的蒸发效应强于热毛细对流作用, 蒸发吸收气层和液面的热量, 同时, 此时的热毛细对流很弱, 从热端带到冷端的热量很少, 由此导致气层和液面温度降低, 气层接近液面附近温度最低; 随着温差的加大, 液面的热毛细对流逐渐加强, 液层表面更多的热量被从热端输送到冷端, 提高了液面温度, 此时液面同时向气层和蒸发效应提供热量, 使得界面处的液层温度慢慢高于气层温度。温差越来越大后, 液面的热毛细对流也越来越大, 液面温度提高越多, 气层温度也随之升高, 但气层中由于较低的热传导系数, 温度升高幅度要小于液层, 因而蒸发界面温度不连续的数值随外加温差增大而增大。

### 3 结 论

本文实验研究了存在蒸发界面的水平液层中

的热毛细对流。测量了蒸发汽/液界面处竖直方向的温度分布, 初步研究了蒸发效应和热毛细对流耦合作用对蒸发界面处温度分布的影响, 并与 C. A. Ward 的实验结果进行了比较分析, 主要结论归纳如下:

- (1) 在普通的常温常压环境下, 蒸发液层汽/液界面处存在明显的温度不连续, 与 Ward 极端条件下的实验结果相比, 温度不连续数值要小, 温度梯度方向相反。
- (2) 外加温差的增大改变了蒸发效应和热毛细对流的相对作用强度, 使得蒸发界面处的温度不连续产生从负值到正值的转变。

### 参 考 文 献

- [1] Smith M K, Davis S H. Instabilities of Dynamic Thermocapillary Liquid Layers [J]. Part 1. Convective Instabilities. *J. Fluid Mech.*, 1983, 132: 119–144
- [2] ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng. Experimental Investigating of Thermocapillary Convection in a Liquid Layer with Evaporating Interface [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25(11): 4046–4049
- [3] ZHU Zhiqiang, LIU Qiusheng. Coupling of Thermocapillary Convection and Evaporation Effect in a Liquid Layer when the Evaporating Interface is Open to Air [J]. *Chin. Sci. Bull.*, 2010, 55(1): 1–6
- [4] JI Yan, LIU Qiusheng. Coupling of Evaporation and Thermocapillary Convection in a Liquid Layer with Mass and Heat Exchanging Interface [J]. *Chin. Phys. Lett.*, 2008, 25(2): 608–611
- [5] Ward C A, Duan Fei. Turbulent Transition of Thermocapillary Flow Induced by Water Evaporation [J]. *Phys Rev E*, 2004, 69(5): 056308-1~056308-10
- [6] Duan Fei, Ward C A. Surface Excess Properties from Energy Transport Measurements During Water Evaporation [J]. *Phys. Rev. E*, 2005, 72(5): 056302-1–056302-11